



中国移动
China Mobile

研究院
CMRI

2030+技术趋势白皮书

中国移动通信有限公司研究院

2020年11月

VISIT...

LANZAROTE
Caliente.COM

目录

1	前言.....	3
2	未来技术发展趋势概述.....	4
2.1	全频谱通信.....	4
2.2	空天地一体.....	5
2.3	DOICT 融合	7
2.4	网络可重构.....	7
2.5	感知-通信-计算一体化	8
3	无线使能技术.....	9
3.1	分布式超大规模 MIMO	10
3.2	智能超表面.....	11
3.3	超奈奎斯特传输技术.....	12
3.4	变换域波形.....	14
3.5	AI 驱动的物理链路	16
3.6	即插即用链路控制.....	17
3.7	自适应空口的 QoS 控制	18
4	网络使能技术.....	19
4.1	轻量化信令方案.....	19
4.2	端到端的服务化设计	20
4.3	智慧感知功能.....	23
4.4	基于数字孪生的网络自治体系.....	24
4.5	确定性数据传输.....	25
4.6	可编程网络.....	27
5	总结.....	29
	参考文献.....	29

1 前言

面向 2030+, 6G 将在 5G 基础上全面支持整个世界的数字化, 并结合人工智能等技术的发展, 实现智慧的泛在可取、全面赋能万事万物, 推动社会走向虚拟与现实结合的“数字孪生”世界, 实现“数字孪生, 智慧泛在”的美好愿景^[1]。围绕这一总体愿景, 6G 网络将在智享生活、智赋生产、智焕社会三个方面催生全新的应用场景, 比如孪生数字人、全息交互、超能交通、通感互联、智能交互等。

这些场景将需要太比特级的峰值速率、亚毫秒级的时延体验、超过 1000km/h 的移动速度以及安全内生、智慧内生、数字孪生等新的网络能力。为了满足新场景和新业务的更高要求, 6G 空口技术和架构需要相应的变革。6G 愿景、性能与潜在使能技术的关系如图 1 所示。

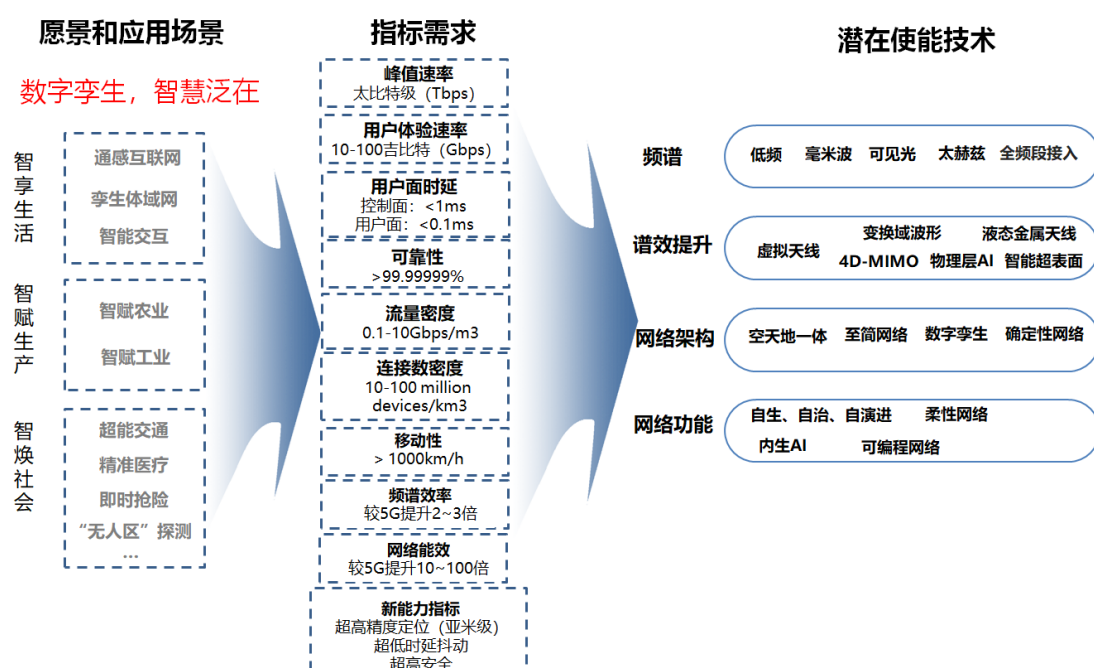


图 1. 6G 愿景、性能与潜在使能技术

白皮书对无线网络的未来技术发展趋势进行了预测和探讨，介绍了无线接入网潜在的关键技术。

2 未来技术发展趋势概述

目前随着信息通信技术与大数据、人工智能的深度融合，网络泛在性的进一步扩展，用户体验和个性化服务需求的持续提升，许多新的使能技术不断涌现的同时，未来网络也呈现出如下一些大的特征与发展趋势。

2.1 全频谱通信

随着通信需求的不断提高，移动通信网络需要更多的频谱，由于 6GHz 以下的频谱已经分配殆尽，26GHz、39GHz 的毫米波频段也已经分配给 5G 使用，需要研究更高频段，如 THz 和可见光，以满足更高容量和超高体验速率的需求。

可见光通常指频段 430~790THz（波长为 380~750nm）的电磁波^[2]，有约 400THz 候选频谱，太赫兹指的是频段 0.1~10THz（波长为 30~3000 μm ）的电磁波^[3]，有约 10THz 候选频谱，两者都具有大带宽的特点，易于实现超高速率通信，是未来移动通信系统的一个潜在补充。

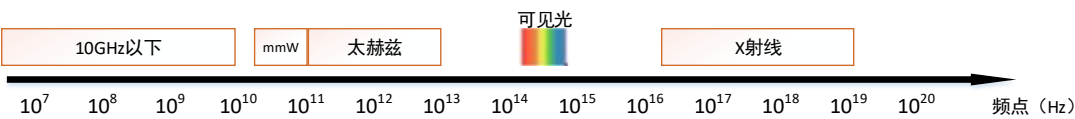


图 2. 频率分布

可见光和太赫兹的空间传输损耗都很大，因此在地面通信中不适用于远距离传输，而适合于在局域和短距离场景提供更大的容量和更高的速率。为了提升覆盖，可见光通信可利用其低功耗、低成本、易部署等特点，并与照明功能结合，采用超密集部署实现更广泛的覆盖；而太赫兹通信由于波长短，天线阵子尺寸小，发送功率低，因此更適合与超大规模天线结合使用，形成宽度更窄，方向性更好的太赫兹波束，有效地抑制干扰，提高覆盖距离。

从整个 6G 移动通信网络的部署来看，需要综合考虑成本、需求和业务体验，分场景地有效使用所有可用的频率资源。6GHz 以下的频段仍将发挥重要的作用，特别是提供无缝的网络覆盖等，毫米波将会发挥更重要的作用，THz 和可见光频段将会在局域和短距离场景提供更大的容量和更高的速率。因此，可见光与太赫兹通信引入移动通信网络后，需要考虑 6GHz 以下、毫米波、太赫兹、可见光等全部频段的深度融合组网，实现各个频段的动态互补，以优化全网整体服务质量、降低网络能耗。

2.2 空天地一体

未来网络在大幅度提高用户体验速率的同时，还要满足飞机、轮船等机载船载互联网的网络服务需求，保障高速移动的地面车辆、高铁等终端的服务连续性，支持即时抢险救灾、环境监测、森林防火、无人区巡检、远洋集装箱信息追踪等海量物联网设备部署，实现人口稀少区域低成本覆盖等需求。故未来的主要形式是将网络覆

盖范围拓展到太空、深山、深海、陆地等自然空间的立体覆盖网络，因此需要构建空天地一体化网络，实现通信网络全球全域的三维立体“泛在覆盖”。

空天地一体化网络主要包括不同轨道卫星构成的天基、各种空中飞行器构成的空基以及卫星地面站和传统地面网络构成的地基三部分，具有覆盖范围广、可灵活部署、超低功耗、超高精度和不易受地面灾害影响等特点。

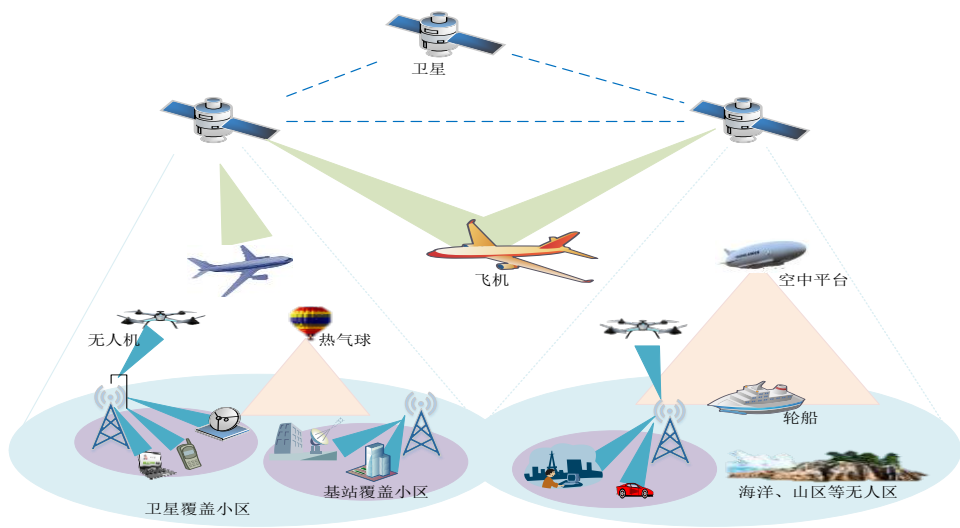


图 3. 空天地一体化网络

面向 6G 的空天地一体化将卫星通信网络作为地面通信网络的重要补充和延伸，并将两者深度融合，显著提高用户空口接入能力和立体覆盖能力^[4]。通过空天地一体化网络的星地资源协作调度以及星地无缝漫游，可为用户提供无感知的一致性服务，确保网络韧性鲁棒以及资源绿色集约。

2.3 DOICT 融合

6G 是通信技术、信息技术、大数据技术、AI 技术、控制技术深度融合的新一代移动通信系统，呈现出极强的跨学科、跨领域发展特征。6G“数字孪生、智慧泛在”愿景，需要从信息采集、信息传递、信息计算、信息应用多个环节端到端设计。DOICT 融合将是 6G 端到端信息处理和服务架构的发展趋势。

ICT 深度融合推动网络全维可定义，是柔性网络的基础。DICT 深度融合推动人工智能与大数据全面渗透网络，是智能网络的基础。DOICT 深度融合推动确定性网络发展，是自动化系统与数字孪生系统的基础。

DOICT 将在大数据流动的基础上实现云、网、边、端、业深度融合，以区块链为代表的手段创造可信环境，提升各方资源利用效率，协同升级云边计算能力、网络能力、终端能力和业务能力。

2.4 网络可重构

随着移动通信技术的快速发展，业务需求与场景更加多元化、个性化，未来 6G 网络将采用更加灵活的可重构架构设计。一方面基于共享的硬件资源，网络为不同用户的不同业务分配相应的网络和空口资源，实现端到端的按需服务，在提供极致服务的同时，实现资源共享，以最大化资源利用率，降低网络建设成本；另一方面，极简的网络架构、灵活可扩展的网络特性为后续网络维护、升级及优化提供极大的便利，进一步降低运营商网络运营成本。另外，面向 6G 智慧内

生的特征需求，也对网络提出了更强的计算能力以及可扩展能力。

2.5 感知-通信-计算一体化

感知-通信-计算一体化是指在信息传递过程中，同步执行信息采集与信息计算的端到端信息处理技术框架，将打破终端进行信息采集、网络进行信息传递和云边进行计算的烟囱式信息服务框架，是提供无人化、浸入式和数字孪生等感知通信计算高度耦合业务的技术需求。

感知-通信-计算一体化具体分为功能协同和功能融合两个层次^[5]。在功能协同框架中，感知信息可以增强通信能力，通信可以扩展感知维度和深度，计算可以进行多维数据融合和大数据分析，感知可以增强计算模型与算法性能，通信可以带来泛在计算，计算可以实现超大规模通信。

在功能融合框架中，感知信号和通信信号可以一体化波形设计与检测，共享一套硬件设备。目前雷达通信一体化技术已成为热点，将太赫兹探测能力与通信能力融合，以及将可见光成像与通信融合成为6G 潜在的技术趋势。感知与计算融合成算力感知网络，计算与网络融合实现网络端到端可定义和微服务架构。

未来，感知通信计算可以在软件定义芯片技术发展基础上，实现功能可重构。

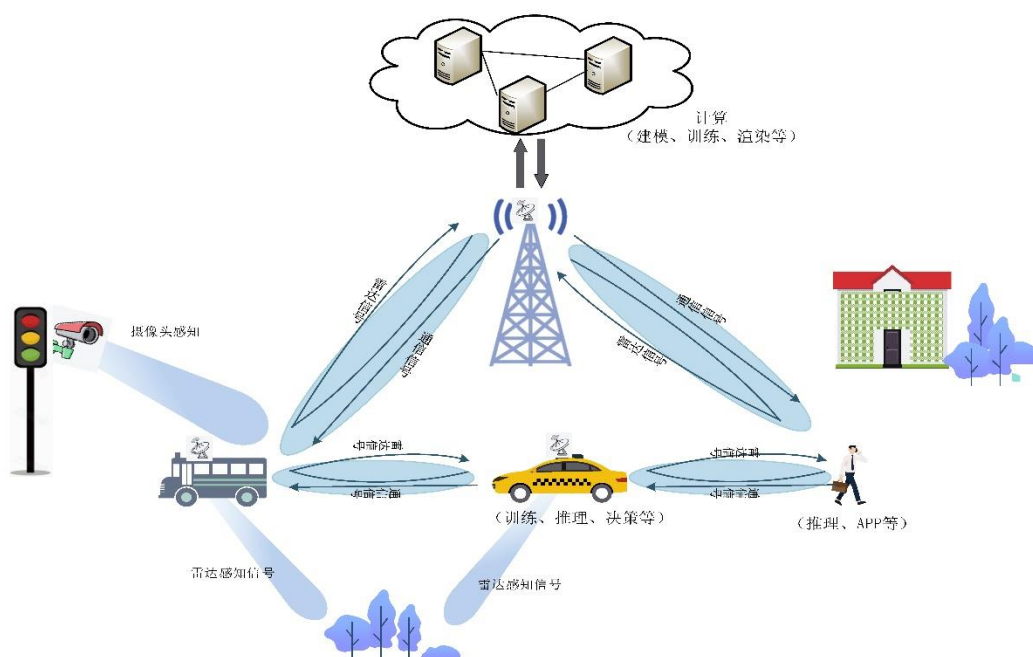


图 4. 感知-通信-计算一体化应用场景

感知-通信-计算一体化的应用场景包括无人化业务、沉浸式业务和数字孪生业务。在无人化业务领域，提供智能体交互能力和协同机器学习能力，在沉浸式业务领域，提供交互式XR的感知和渲染能力，全息通信的感知、建模和显示能力，在数字孪生业务领域提供物理世界的感知、建模、推理和控制能力，在体域网领域提供人员监控、人体参数感知与干预能力。

3 无线使能技术

面对新应用场景带来的新指标需求，比如 Tbps 量级的峰值速率、Gbps 级别的用户体验速率、近有线连接的时延等需求，仅依靠现有的 5G 技术是难以满足的，为此业界也在积极研究一些新技术、新架构、新设计，期望形成一些新的突破。本章将从基础传输技术、协议

与架构设计以及自治网络技术三个方面，对未来无线接入网潜在关键技术进行分析。

众所周知，更大带宽可以提升系统峰值速率，但是频谱效率的提升还需要依赖于物理层传输技术的发展。本节从物理层基础理论出发，阐述未来网络提升无线传输信号质量的潜在关键技术方向。

3.1 分布式超大规模 MIMO

引入超大规模 MIMO 后，4G/5G 网络容量得到了大幅提升，但是由于路径损耗以及小区间干扰，小区边缘用户体验仍有待改善。分布式超大规模 MIMO 将传统的集中部署方式拓展至分布式部署，在多个分布式节点之间引入智能协作，实现资源的联合调度和数据的联合发送，如图 5 所示。通过分布式部署以及智能协作，一方面有效消除干扰，增强信号接收质量；另一方面有效增强覆盖，为用户带来无边界性能体验。在未来 6G 网络，尤其是更高频段、密集部署场景中将呈现出极大应用潜力^[6]。

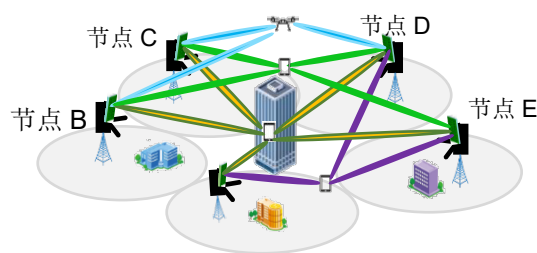


图 5. 分布式超大规模 MIMO 示意

业界已从理论上论证分布式 MIMO 在提升信道容量方面的优势。理论分析表明，在天线总数、发射总功率及覆盖范围相同条件下，分布式 MIMO 系统中由于始终存在更接近用户的分布式节点，同时利

用调度和赋形的智能协作，其性能较之集中式 MIMO 更为均匀，特别是对于边缘用户性能增益更为显著^[7-9]。

分布式超大规模 MIMO 由于其天线规模、节点数显著增多，对节点间信息交互能力、联合的协作节点选择和赋形方案设计、算法复杂度、干扰处理等提出了挑战；同时，相干联合发送对节点之间收发通道的一致性也提出了更高要求，需要进一步研究空口校准方案。

3.2 智能超表面

智能超表面（Reconfigurable Intelligent Surface, RIS）通过表面上的结构单元对电磁波进行控制，通过对每个结构单元的参数、位置进行调整，实现对任意的电磁波反射/透射幅度和相位分布的调整。在解决非视距传输、减小覆盖空洞等传统无线通信痛点问题具有积极意义。

图 6 给出了一种 RIS 辅助下的无线通信的系统示意。基站对 RIS 进行控制，RIS 基于控制对自身结构单元的幅度和相位进行调整^[10]，从而实现对基站发射信号的有控制地反射。与传统中继通信相比，RIS 可以工作在全双工模式下，具有更高的频谱利用率^[11]。RIS 无需 RF 链路，不需要大规模供电，在功耗和部署成本上都将具有优势^[12]。

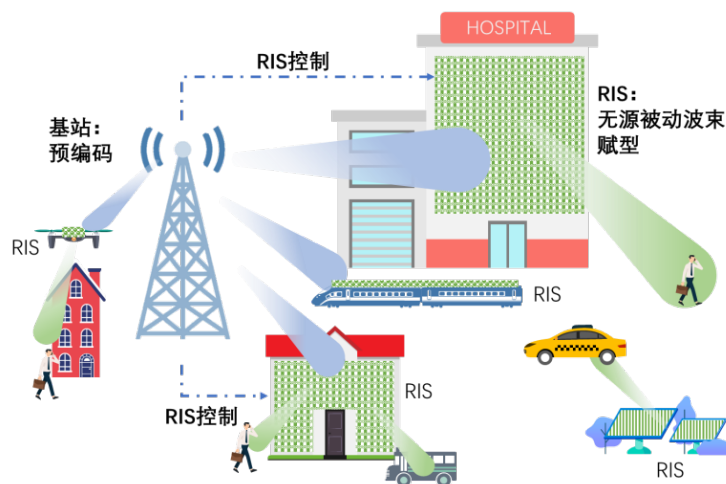


图 6. RIS 辅助通信系统

RIS 在无线移动通信中的实际应用效果，依赖于超材料的研究成熟度以及数字控制超材料的精度和效率。同时，无源特性导致的超表面信道难估计问题、基站和 RIS 可实用联合预编码方案以及 RIS 网络架构与控制方案都有待更深入的研究。

3.3 超奈奎斯特传输技术

在传统通信系统中，为了避免符号间干扰（ISI，Inter-Symbol Interference），通常采用奈奎斯特准则，从而限制了发送的码元速率。超奈奎斯特传输技术^{错误!未找到引用源。}采用更快的速率发送码元，在传输时人为引入 ISI，再通过接收端过采样，利用更高级的接收机消除 ISI，如图 7 所示，从而提升链路实际传输速率和频谱利用率。

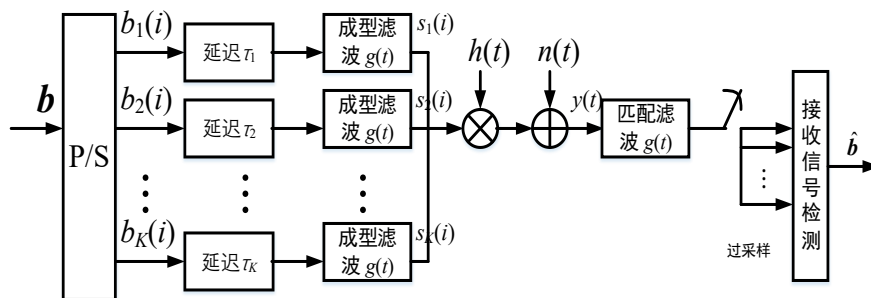


图 7. 超奈奎斯特传输系统收发框图示意

超奈奎斯特传输信号的功率谱密度只与发送滤波器的频率响应函数有关，并不会扩展带宽^[14]。图 8 中对比了超奈奎斯特传输系统与传统奈奎斯特系统的带宽，其中基带时域波形为矩形波，超奈奎斯特传输系统的重叠层数为 4。从图中可见，超奈奎斯特传输系统不会改变频谱的分布形状，即不会扩展带宽。

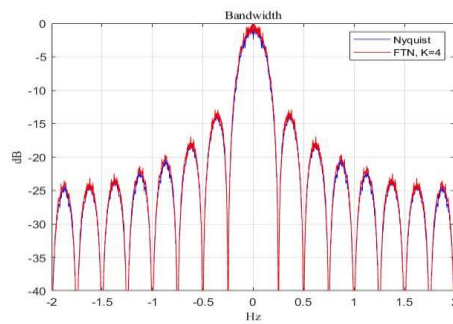


图 8. 超奈奎斯特系统与奈奎斯特系统带宽对比

在多天线系统中，利用超奈奎斯特传输技术，在发射天线之间产生延迟，利用过采样创建虚拟的接收天线，可以在用户侧天线数量受限时提升空间复用和分集增益。因此即使是单天线用户也可以实现空间复用增益^{[15][16]}。从图 9 可以看出在高信噪比时，基于超奈奎斯特传输的虚拟天线系统相比传统 MISO 增益明显，信噪比 10dB 时，可以获得超 40%的容量增益。

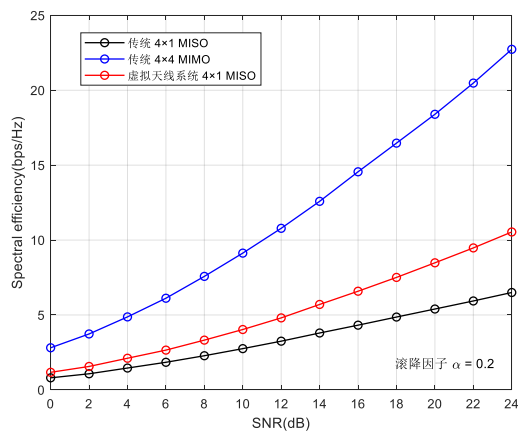


图 9. 超奈奎斯特传输与传统奈奎斯特传输系统容量对比

超奈奎斯特传输技术的最优译码算法是基于最大似然序列估计的 Viterbi 译码算法，然而其复杂度随重叠程度的增加呈指数增长。因此，低复杂度接收机设计对该系统的实用化发展至关重要。同时，未来多载波、大规模天线仍是主流技术，如何与 OFDM/MIMO 技术结合，并考虑实际多径衰落信道对系统影响需要深入探讨。

3.4 变换域波形

波形技术在历代无线通信系统的空中接口设计中都占有举足轻重的地位。4G 和 5G 系统采用的 OFDM 波形，性能依赖于其子载波间的正交性。如果子载波间的正交性受到多普勒频偏等因素的破坏，性能往往会明显下降。

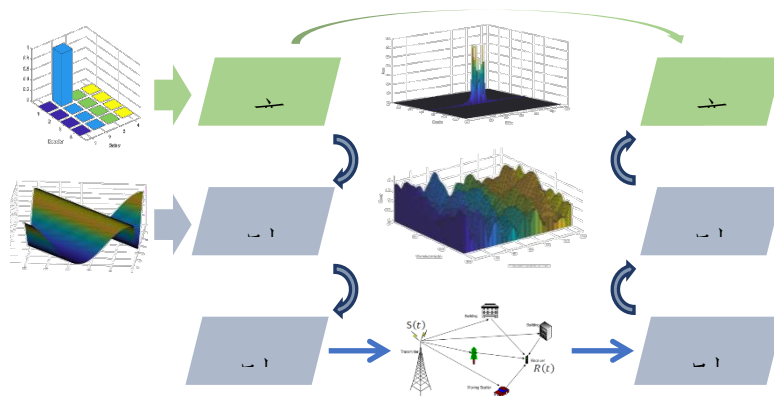


图 10. 变换域波形原理示意图

变换域波形旨在克服 OFDM 波形的上述缺点。不同于传统波形方案认为发送符号位于经典的时频域，变换域波形认为发送符号位于其他对偶域（如时延-频率、时变-多普勒等对偶域），如图 10 所示。通过对偶域间的变换，变换域符号可以达到一种多维分集的效果，从而将 OFDM 波形中的多普勒频偏等不利因素作为一种分集自由度有效利用起来提升传输性能。

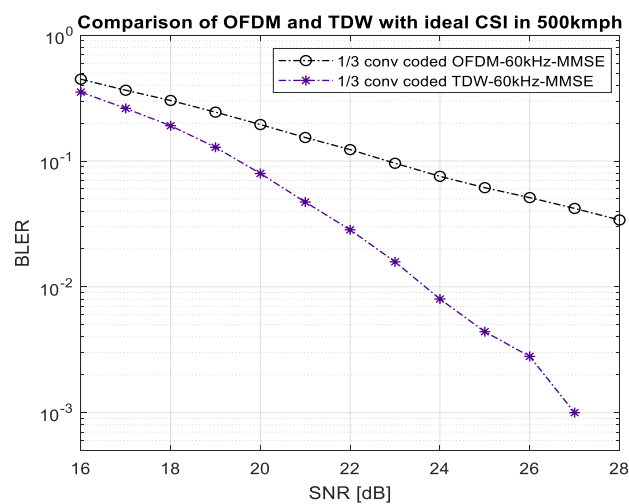


图 11. 变换域波形与 OFDM 性能对比

图 11 给出了 500km/h 移动环境中理想信道估计假设下变换域波

形与 OFDM 间的误块率性能对比。仿真中考虑了 CDL 信道模型，子载波间隔 60kHz，信道编码为 1/3 码率的卷积码，子载波个数为 128，变换域波形考虑连续 6 个时域 OFDM 符号的联合处理。结果表明变换域波形可以有效应对高速移动环境中的多普勒频偏，取得更优的误块率性能。

尽管相关研究表明变换域波形方案在高速移动等场景下相比于传统基于 OFDM 的波形方案可以取得明显增益^{[17][18]}，但如何以较低的代价精确恢复发送信号是变换域波形研究中一个重要课题。另外，如何设计高效的参考信号以低开销精确获取多天线信道需要进一步研究。

3.5 AI 驱动的物理链路

自 5G 通信起，无线网络的智能化成为一个重要课题，旨在实现对网络资源更加高效的分配与利用。AI 技术作为目前无线网络智能化的主要使能技术之一，正在渗透到核心网、网管、以及接入网的物理层和高层协议栈等各个层面^[19]。其中，物理层 AI 泛指利用人工智能/机器学习方法实现或增强无线网络物理层功能的技术方案。

AI 在物理层主要可以应用于 CSI 处理、接收机设计以及端到端链路设计等方面^[20-22]。例如，利用深度学习中的神经网络来学习无线通信中高维 CSI 的压缩表示，从而降低 CSI 反馈开销^[20]；利用人工神经网络学习从接收到的干扰信号到原始信号的逆映射，可以不需要显式的信道估计与均衡^[21]；在特定的信道环境下联合优化发射机和接收

机，可以学习信道中的非理想效应，提升传输性能^[22]。

然而以“黑盒”方式用 AI 模块来代替传统物理层模块在性能上将很难超越传统设计。相比之下，将人工智能方法与人类专家知识两者相结合的思路是可以汲取双方优点的更佳选择。另外，要充分发挥 AI 在降低开销和复杂性方面的潜力，就需要对参考信号和空口资源分配进行相应设计甚至多链路模块之间的联合设计，因此可能对现有的空口框架与信令设计产生更多的影响。

3.6 即插即用链路控制

6G 无线接入网需要具备覆盖自动扩展能力，以更好的完成立体全场景的覆盖，当新的网络服务体加入网络时，能够快速握手、即插即用，实现覆盖扩展。

即插即用链路控制技术包括以下几个方面：

流程感知：感知各种类型的接入请求，并启动合适的握手及控制信令流程。对于不同种类的接入点，需要准确识别，快速完成接入，实现覆盖的灵活扩展。

云对边的控制协调：云端对边缘接入点的灵活精准管控，包括诸如接入控制、自动分配带宽资源、链路间协调。云端的处理可以引入 AI 能力来支撑上述功能。

接入点的自生成自优化：利用数字孪生/AI 等技术对各种接入点进行全自动化、全生命周期的管理和监控。当接入点新加入网络时能够自动完成配置实现自生成；当接入点运行时，根据实时场景进行参

数调整、自动优化，按需改进服务，以更好的满足用户的需求。

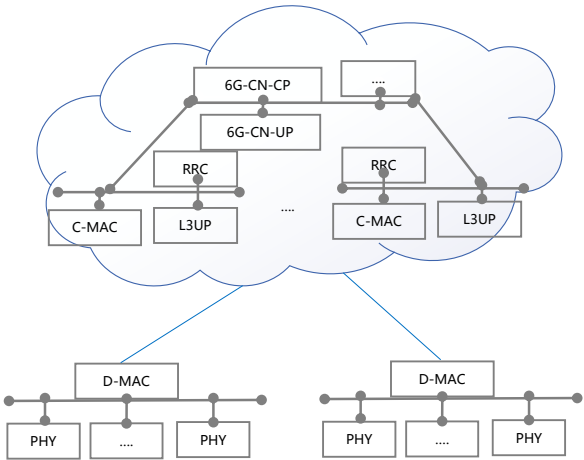


图 12. 即插即用链路控制

云和边之间需要高速高效的传输通道以及大带宽高实时性的传输带宽来确保即插即用接口间的信息实时交互，同时还需要强大的数字孪生和 AI 算法支撑完成对远端接入点的自动管控。

3.7 自适应空口的 QoS 控制

6G 时代将是高度数据化、智能化的时代。全息影像，XR 业务、虚拟空间感知与交互等新业务都对 6G 网络的业务质量保障提出了更多的极致要求。

自适应空口的 QoS 控制是基于端到端 QoS 约束，根据实时的空口传输特征、相对有限的空口资源、发送-反馈的时间约束等，实现空口传输数据的 QoS 保障，其是按需空口服务和高效网络能力关键技术。

自适应空口的 QoS 控制包括以下几个方面：

1. 灵活的 QoS 探测机制：结合 AI/大数据技术，实现对承载的业

务的 QoS 探测和建模，以及自适应调整。

2. 业务 QoS 和空口能力的深度融合：探索业务 QoS 和空口服务能力结合的全新的 QoS 机制。无线接入网基于业务的精准需求，通过调度和无线资源管理将业务需求与实时的空口状态相匹配。

3. AS 层端到端的 QoS 机制：终端结合接入网提供的 QoS 信息进行更精细的 QoS 管理，实现上下行数据在空口的精准高效传输。

面向未来，6G 网络的业务需求在不断演进发展，QoS 机制涉及到核心网、传输网、和接入网，结合核心网，传输层和接入网统一协调的 QoS 机制是后续需要考虑的问题。

4 网络使能技术

4.1 轻量化信令方案

从 2G, 3G, 4G 到 5G 的发展历程来看，随着网络规模的不断扩展和复杂度的日益剧增，导致了网络架构的复杂冗余。按照已有网络发展趋势，支撑万物互联的 6G 网络的复杂度将呈几何级增长。轻量化的信令方案是 6G 设计必然选择。

6G 的无线接入网需要按照统一的信令方案进行设计，在统一的信令控制下融合多种空口接入技术，实现空口的统一控制，降低终端接入网络的复杂度。

在协议栈功能设计方面，可以考虑差异化的协议功能设计，优化协议功能分布和接口设计，结合 AI 技术进一步增强协议功能。

在网络功能方面，6G 网络可以分为广覆盖信令层和按需的数据层。通过信令面和用户面分离的机制，采用统一的信令覆盖层保证可靠的移动性管理和快速的业务接入；通过动态按需的数据层加载，满足网络用户的业务需求。二者之间灵活配合，以降低基站部署的数量，提高用户的业务感知体验。

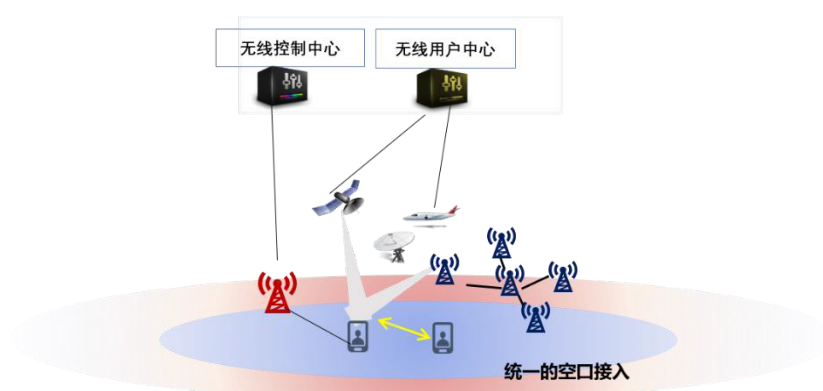


图 13.轻量化信令控制

轻量化信令方案需要高可靠、低时延、低成本的传输网支撑，传输网需要灵活的拓扑结构和足够的带宽。需要无线控制中心-传输网-网络接入点统筹一体化设计。另外，信令和业务分离需要统筹 6G 可用频段，充分发挥广覆盖与业务灵活加载的优势。

4.2 端到端的服务化设计

随着 DOICT 技术的深度融合以及大量新型业务的涌现，运营商需要网络具有敏捷响应新需求的能力，以快速提供网络服务。

基于云原生的服务化技术是使能上述能力的重要技术，驱动协议功能向服务化架构演进。基于服务化架构的协议功能具有按照业务需求运行协议功能的能力，技术特征体现在以下几个方面：

1.云原生服务化技术驱动的协议功能：在遵守各协议层逻辑约束关系的前提下，把协议功能实体重构成可灵活组合的模块，各个模块能够按需灵活组合、部署和运行实现网络新业务服务能力。

2. 云原生服务化技术驱动的接口：接入网内部及外部的接口基于云原生服务化接口形态和接口协议进行重构，已支撑协议功能模块的灵活组合和网络能力开放；

3. 云原生服务化技术驱动的能力开放：向第三方提供方便快捷统一的接入网信息交换机制和策略调整机制，实现融智共赢。



图 14. 基于服务化架构的协议

- 协议功能重构后的功能包括基础功能和增量功能两大类：
- 1) 基础功能包括小区级功能，如连接管理、用户面管理、UE 节能管理等功能以及相应的网络服务。
 - 2) 增量功能包括接入网服务注册、数据采集与存储、能力开放、AI 分析与决策等功能及相应的网络服务。

接入网功能的高实时性和高灵活性对平台的存储、计算力和信息交互的实时性都提出了很高的要求，DOICT 深度融合技术能否支撑该要求还需要进一步研究和验证。同时，接入网功能耦合紧密，如何实现功能合理的“高内聚低耦合”是一个庞杂的系统工程。而且，目前的服务化技术相对于传统解决方案，带来单设备成本的增加，如何实现成本和收益的平衡是系统性问题。

基于服务化架构的协议运行在云平台上，利用云原生实现基于微服务化的开发、部署与管理。云原生平台需要适应网络特点，实现高效、开放、跨多云的部署。

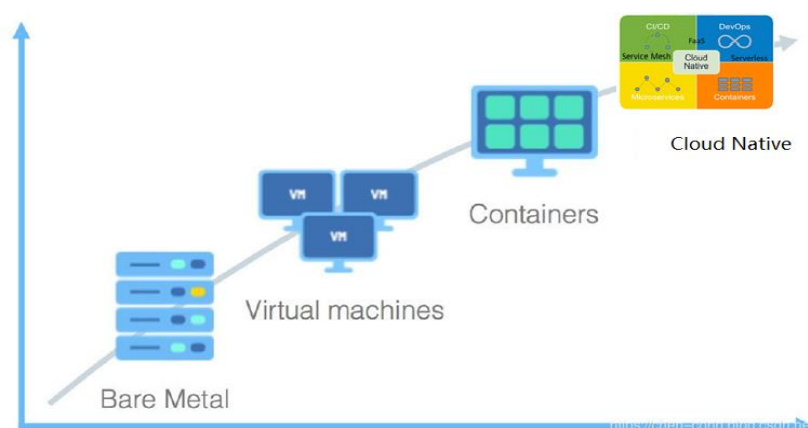


图 15. 云化技术演进趋势

近 20 年，计算技术经历了从裸机到虚拟机、到容器的快速发展，云原生已经成为最适合云架构的技术实践。云原生是面向云应用设计的一种思想理念，充分发挥云效能的最佳实践路径，可以帮助运营商构建弹性可靠、松耦合、易管理可观测的网络系统，提升交付效率，降低运维复杂度。代表技术包括不可变基础设施、服务网格、声明式 API 及 Serverless 等。云原生技术架构具备以下典型特征：极致的弹性能力可实现秒级甚至毫秒级的响应；高度自动化的调度机制可实现极强的自愈能力；高度适配性可实现跨区域、跨平台甚至跨服务商的规模化大规模可复制部署能力。云原生大大降低了云计算的门槛，可以实现研发与运维的跨域协同，提升开放迭代速度，并赋能业务创新。当前云原生热点技术正在呈现井喷式爆发，包括多云容器编排、云原生服务器、云原生存储、云原生网络、云原生数据库、云原生消息队列、服务网格、Serverless 容器、函数即服务（FaaS）、后端即服

务（BaaS）等。

电信服务对性能、低时延、可靠性、安全性、设备成本都有更高的要求，这些都需要云原生技术针对电信业务特点进行演进，以满足电信业务高标准的特点。

4.3 智慧感知功能

面向 6G 的超低时延，高带宽的云强交互式业务越来越多。现有应用层、业务传输层、移动网络层“分层”和“烟囱式”的设计，造成数据包传输时延长，导致用户体验的下降。

为了实现业务传输能力和网络能力的实时精准匹配，需要引入端到端网络各协议层的高精度实时测量和反馈，使能协同优化^[23]，并在网络端引入智能处理功能，包括智能化估计和预测，一方面对测量和交互数据进行预处理，实现降维和压缩，另一方面根据应用层&业务传输层的需求进行订阅和通知，降低对网络传输的开销。

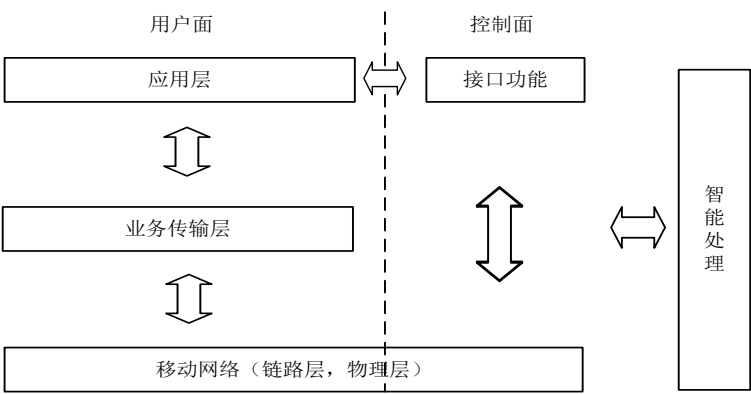


图 16. 跨层联合架构设计

同时，对应用层的传输需求进行深度的智能化感知，在充分保障用户隐私的前提下，实现包级别的传输需求实时感知和预测，为业务

传输层的拥塞控制和移动网络层资源调度提供精细颗粒度的指导。

智慧感知网络服务体系需要多协议层、多网元、多技术领域协作，面临技术方案验证难度大，以及潜在非标功能的引入等诸多挑战。同时，由于各协议层的联合设计和交互的标准化涉及多个标准组织和工作组，各新技术在标准化中的推进面临很大挑战。

4.4 基于数字孪生的网络自治体系

数字孪生技术是指通过数字化手段将物理世界实体在数字世界建立一个虚拟实体，借此实现对物理世界实体实现动态观察、分析、仿真、控制与优化。数字孪生网络技术包括功能建模、网元建模、网络建模、网络仿真、参数与性能模型、自动化测试、数据采集、大数据处理、数据分析、人工智能机器学习、故障预测、拓扑与路由寻优。从而把网络每一个阶段不好解决的难题转换到数字世界来求解，通过监控、预测、优化、仿真，实现网络的自治能力。

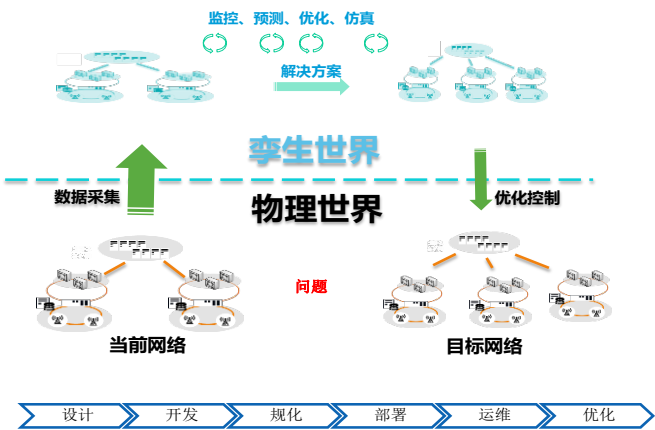


图 17. 数字孪生实现网络自治

基于数字孪生技术和人工智能技术，6G 网络将是具备自优化、自演进和自生长能力的自治网络。自优化网络对未来网络状态的走势

进行提前预测，对可能发生的性能劣化进行提前干预，数字域持续地对物理网络的最优状态进行寻优和仿真验证，并提前下发对应的运维操作自动地对物理网络进行校正。自演进网络基于人工智能对网络功能的演化路径进行分析和决策，包括既有网络功能的优化增强和新功能的设计、实现、验证和实施。自生长网络对不同业务需求进行识别和预测，自动编排和部署各域网络功能，生成满足业务需求的端到端服务流；对容量欠缺的站点进行自动扩容，对尚无网络覆盖的区域进行自动规划、硬件自启动、软件自加载。

数字孪生技术作为应用于网络领域的新理念，需要在业界形成更多共识。从工业界以及其它行业的过程来看，这需要较长的时间。同时，数字孪生技术依赖大量的数据采集，这将增加设备成本，数据采集的方式也需要突破性的创新。

4.5 确定性数据传输

确定性的概念最初在 IEEE 提出并进行标准化。IEEE 802.1 工作组于 2007 年创建了音频视频桥接（AVB）任务组，其目标是用以太网取代家庭中的 HDMI、扬声器和同轴电缆。随着 IEEE 802.1AVB 标准在工作室、体育和娱乐场所的成功应用，这一技术开始吸引工业界和汽车界的关注。2012 年，IEEE 802.1AVB 任务组更名为时间敏感网络（TSN）任务组。TSN 标准扩展了 AVB 的技术，具有时间同步、时延保证等确保实时性的机制，支持流量调度和整形、可靠性、配置管理等相关协议。2015 年，IETF 成立了确定性网络(DetNet)工作组，

致力于将基于以太网的确定性技术扩展到广域 IP 网络，提供延迟、丢包和抖动的最坏情况界限，以提供确定的数据传输。

从上可以看出，固定网络的确定性传输已经提出有 10 年的时间，但是面向移动网络的确定性传输研究才刚刚起步，这主要是由于 1) 空口易受环境影响，传输质量很难预测；2) 缺乏端到端的确定性保障机制。

6G 时代，确定性数据传输将成为 6G 网络的代表能力，实现有界时延、低抖动、高可靠性以及高精度的时间同步等特性。需要攻克的难点包括以下几方面：

1) 无线空口如何实现灵活的资源预留和实时调度

空口的不可预测性，是实现端到端确定性传输的主要瓶颈。这就要求在 6G 时代，首先空口的资源是足够的、非受限的，数据报文在接入网内可以进行实时灵活调度，保障报文可以在规定的时间内处理完毕并且发出。

2) 如何实现广域的确定性传输机制

IEEE TSN 技术的难以应用于广域，这主要是由于 TSN 系统中的 CNC 无法进行大规模的路径运算和准确的实时调度，以及时间同步精度随着路径延长而越来越低。

3) 如何实现跨层、跨域的确定性机制融合

5G 时代，移动网络依然是承载在 IP 之上的一层网络，这对跨域协同的确定性传输调度提出了严苛的挑战。在 6G 时代，从网络设计之初就希望能够实现异构接入、固移融合、协同管理，移动网络需要

吸取现有固定网络的二层、三层确定性传输协议，实现部署融合、协议支持、协同调度，从而实现端到端跨层、跨域的确定性数据传输。

4.6 可编程网络

6G 网络需要支持网络可编程能力，实现接入、边缘、核心、广域、数据五网协同，从而使电信网络具备跨多业务、多领域、全生命周期的全场景可定制能力。

网络可编程能力体现在很多的层次上，从下往上依次为芯片可编程（如 P4、POF）、FIB 可编程（如 OpenFlow）、RIB 可编程（如 BGP、PCEP）、设备 OS 可编程、设备配置可编程（如 CLI、NETCONF/YANG、OVSDB）、控制器可编程和业务可编程（如 GBP、NEMO）。

未来网络需要从网元、协议、业务、管理四个维度满足可编程能力。

1) 设备网元可编程：

随着数据业务类型呈现出多样化、个性化态势，面对用户对新网络功能的需求层出不穷，设备网元的协议栈支持的网络功能有限，所用的网卡芯片也不可能预测未来几年内所有可能出现的网络功能。网元作为网络的基本组成，需要其硬件架构允许用户重新定义功能，能够按需完成不同类型协议、封装\解封装的处理。同时上层软件体系结构由功能划分清晰的模块或 API 组成，允许用户重新组织这些模块或调用接口来达到定制的目的，如分类、整形、QoS 等。设备网元支持

可编程，使得高效支持用户的定制化和新协议持续演进成为可能。

2) 网络协议可编程

电信网络和数据网络的职能划分越来越模糊，网络协议和架构也在互相渗透。随着应用场景不断演进，对网络协议栈功能的新需求层出不穷，网络协议的演进和创新也不断涌现（如 NewIP、SRv6、QUIC 等），面对新旧协议的长期并存，势必要求端到端网内、网间的协议能够支持同步切换，甚至根据用户业务类型和质量要求对切片端到端的网络协议按需进行选择。进而实现后 5G+网络向 6G 网络平稳切换。

3) 业务路径可编程

端到端网络承载越来越丰富的业务，我们需要看到网络或网元完成新业务升级的时间是有先后的。支持按需配置不同用户数据使用不同业务处理路径，既能采用利旧改造方案，又能实现向创新网络架构的逐步引流，平稳切换，在有限成本基础上满足用户需求的无限扩展。进一步地，从终端、接入网、核心网、广域网、到数据中心全网的转发路径可测、可调、才真正意义上实现端到端业务的、网、边协同，实现端到端的网络保障。

4) 管理方式可编程

随着电信网络日益复杂、网内运维成本居高不下、网间运维壁垒迟未打通、导致商业变现能力不足、新业务上线速度减缓。管理方式课编程是指在监控和管理方式上，网络中的网元应支持多种或自定义的管理手段，促进资源效率、能源效率、运维效率的三个提升，成就面向用户体验的闭环自治网络系统。

5 总结

随着 5G 的快速规模化商用，尤其是 5G 在物联网和垂直行业中的快速渗透，面向未来的需求将更加明确。通信相关的新业务、新应用、新服务、新材料的领域都在飞速发展，云计算、大数据、区块链、人工智能等新技术与通信技术也在不断融合，迫切需要结合这些最新变化和发展趋势去系统的进行 6G 的设计和研究。

本白皮书介绍了中国移动对 6G 技术发展趋势方面的初步思考，后续将根据研究进展及时更新。中国移动将持续加大基础研究投入，构建产、学、研协同创新平台，共同推动 6G 的发展。

参考文献

- [1]. G.Y.Liu, Y.H.Huang, N. Li et al., "Vision, Requirements and Network Architecture of 6G Mobile Network Beyond 2030", *China Communications*, vol. 17, no. 9, pp. 92-104, 2020.
- [2]. P. Pathak, X. Feng, P. Hu, et al., "Visible light communication, networking, and sensing: a survey, potential and challenges," *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2015, 17(4): 2047-2077.
- [3]. H. Song and T. Nagatsuma, "Present and Future of Terahertz Communications," *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology*, vol. 1, no. 1, pp. 256-263, Sept. 2011.
- [4]. 王爱玲, 潘成康, "星地融合的 3GPP 标准进展与 6G 展望," 《卫星与网络》, 2020.
- [5]. W. Saad, M. Bennis and M. Chen, "A vision of 6G wireless systems: applications, trends, technologies, and open research problems," in *IEEE Network*, vol. 34, no. 3, pp. 134-142, May/June 2020.
- [6]. J. Zhang, S. Chen, Y. Lin, et al., "Cell-Free Massive MIMO: A New Next-Generation Paradigm," in *IEEE Access*, vol. 7, pp. 99878-99888, 2019.
- [7]. D. Wang, J. Wang, X. You, et al., "Spectral Efficiency of Distributed MIMO Systems," in *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 31, no. 10, pp. 2112-2127, October 2013.
- [8]. X. Su, Y. Yuan and Q. Wang, "Performance Analysis of Rate Splitting in K-User

- Interference Channel Under Imperfect CSIT: Average Sum Rate, Outage Probability and SER," in *IEEE Access*, vol. 8, pp. 136930-136946, 2020.
- [9]. N. Li, J. Jin, L. Xia, *et al.*, "Robust Low Complexity Beamforming for Cell-Free Massive MIMO", to appear in *Proc. IEEE VTC2020-Fall*, 2020.
 - [10]. W. Tang *et al.*, "Wireless Communications with Programmable Metasurface: New Paradigms, Opportunities, and Challenges on Transceiver Design," in *IEEE Wireless Communications*, vol. 27, no. 2, pp. 180-187, April 2020.
 - [11]. Q. Wu, S. Zhang, B. Zheng, *et al.*, "Intelligent Reflecting Surface Aided Wireless Communications: A Tutorial," *arXiv:2007.02759v1*, July 2020.
 - [12]. C. Liaskos, S. Nie, A. Tsioliaridou, *et al.*, "A New Wireless Communication Paradigm through Software-Controlled Metasurfaces," in *IEEE Communications Magazine*, vol. 56, no. 9, pp. 162-169, Sept. 2018.
 - [13]. J. E. Mazo, "Faster-than-Nyquist signaling," *Bell Syst. Tech. J.*, vol. 54, no. 8, pp. 1451-1462, 1975.
 - [14]. S. Zhao, Q. Wang, J. Jin and G. Liu, "Performance Analysis of Overlapped Time Division Multiplexing Systems Under Correlated Noise," to appear in *Proc. IEEE GLOBECOM Workshop*, 2020.
 - [15]. Q. Wang, Y. Chang and D. Yang, "Deliberately Designed Asynchronous Transmission Scheme for MIMO Systems," *Signal Processing Letters*, vol. 14, no. 12, pp. 920-923, Dec. 2007.
 - [16]. D. K. C. So and Y. Lan, "Virtual Receive Antenna for Overloaded MIMO Layered Space-Time System," in *IEEE Transactions on Communications*, vol. 60, no. 6, pp. 1610-1620, June 2012.
 - [17]. R. Hadani *et al.*, "Orthogonal Time Frequency Space Modulation," in *Proc. IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC)*, San Francisco, CA, pp. 1-6, 2017.
 - [18]. K. R. Murali and A. Chockalingam, "On OTFS Modulation for High-Doppler Fading Channels," in *Proc. Information Theory and Applications Workshop (ITA)*, San Diego, CA, pp. 1-10, 2018.
 - [19]. S. Han, T. Xie, C.-L. I, *et al.*, "Artificial-intelligence-enabled air interface for 6g: solutions, challenges, and standardization impacts," to appear in *IEEE Commun. Mag.*, Oct. 2020.
 - [20]. C. Wen, W. Shih, and S. Jin, "Deep learning for massive MIMO CSI feedback," *IEEE Wireless Commun. Lett.*, vol. 7, no. 5, pp. 748–751, Oct. 2018.
 - [21]. H. Ye, G. Y. Li, and B. Juang, "Power of deep learning for channel estimation and signal detection in OFDM systems," *IEEE Wireless Commun. Lett.*, vol. 7, no. 1, pp. 114–117, Feb. 2018.
 - [22]. T. O'Shea and J. Hoydis, "An introduction to deep learning for the physical layer," *IEEE Trans. Cog. Commun. Netw.*, vol. 3, no. 4, pp. 563–575, 2017.
 - [23]. Y. Zhang, G. Li, C. Xiong, *et al.*, "MoWIE: Toward Systematic, Adaptive Network Information Exposure as an Enabling Technique for Cloud-Based Applications over 5G and Beyond," *SIGCOMM '20: Annual conference of the ACM Special Interest Group on Data Communication on the applications, technologies, architectures, and protocols for computer communication*. ACM,

2020.